

Helsinki 10.2.2004

PCT/FI 03 / 00921

ETUOIKEUSTODISTUS
PRIORITY DOCUMENT

REC'D 08 MAR 2004

WIPO

PCT



Hakija
Applicant

ABB Oy
Helsinki

Patenttihakemus nro
Patent application no

20022131

Tekemispäivä
Filing date

03.12.2002

Kansainvälinen luokka
International class

H02P

Keksinnön nimitys
Title of invention

"Menetelmä tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin
määrittämiseksi"

PRIORITY DOCUMENT

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Täten todistetaan, että oheiset asiakirjat ovat tarkkoja jäljennöksiä
Patentti- ja rekisterihallitukselle alkuaan annetuista selityksestä,
patenttivaatimuksista, tiivistelmästä ja piirustuksista.

This is to certify that the annexed documents are true copies of the
description, claims, abstract and drawings originally filed with the
Finnish Patent Office.

Eija Solja
Eija Solja
Apulaistarkastaja

Maksu 50 €
Fee 50 EUR

Maksu perustuu kauppa- ja teollisuusministeriön antamaan asetukseen 1027/2001
Patentti- ja rekisterihallituksen maksullisista suoritteista muutoksineen.

The fee is based on the Decree with amendments of the Ministry of Trade and Industry No.
1027/2001 concerning the chargeable services of the National Board of Patents and
Registration of Finland.

Osoite: Arkadiankatu 6 A Puhelin: 09 6939 500
P.O.Box 1160 Telephone: + 358 9 6939 500
FIN-00101 Helsinki, FINLAND

Telefax: 09 6939 5328
Telefax: + 358 9 6939 5328

Menetelmä tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin määrittämiseksi

Keksinnön tausta

Keksinnön kohteena on tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin määrittäminen patenttivaatimuksen 1 johdanto-osan mukaisesti.

Tahtikoneita käytetään yleisesti moottoreina kohteissa, jotka vaativat suurta tehoa ja momenttia. Tyypillisiä tahtikoneiden käyttökohteita ovat esimerkiksi metalliteollisuuden valssauskäytöt, joissa yhden tahtimoottorin teho voi olla useita megawatteja. Valssauskäytön tulee lisäksi olla tarkka ja nopea lopputuotteen laadun takaamiseksi.

Tahtimoottoreiden tarkka ja nopea säätäminen suoritetaan nykyisin tyypillisesti taajuusmuuttajia käyttämällä. Moottoria ohjataan taajuusmuuttajalla siten, että taajuusmuuttajan suuntaajaosa tuottaa toivottua jännitettä tai virtaa moottorin napoihin. Yleisin taajuusmuuttajatyyppe on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, jossa lähdön jännitteet muodostetaan jännitevälipiirin tasajännitteestä vaihtosuuntaajalla eli invertterillä.

Taajuusmuuttajaa käyttämällä voidaan konetta ohjata nopeasti ja tarkoituksenmukaisesti. Jotta tahtikoneen ohjaaminen olisi kuormitusilanteissa ja niiden muutoksissa mahdollista, tulee tahtikoneesta laatia mahdollisimman tarkka sähköinen malli, jonka perusteella koneen sähköistä tilaa voidaan laskea koneen ohjaamista varten. Sähköinen malli vaatii koneen matemaattisen kuvauksen lisäksi tiedot koneen parametreista. Nämä parametrit, kuten erityyppiset induktanssit ja resistanssit saattavat olla erisuuruiset jopa samanlaisissa saman valmistajan koneissa. Tyypillisesti koneen valmistaja ilmoittaa koneelle tarvittavat parametrit, mutta usein valmistajan ilmoittamat mittausarvot ovat epätarkkoja tai vajavaisia.

Ongelmana onkin erityisesti tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin suuruuden määrittäminen. Tämä on aikaisemmin toteutettu käyttämällä kuormakonetta, jonka koko vastaa mittauksen kohteena olevan koneen kokoa. Toinen tunnettu vaihtoehto on lukita akseli erittäin luotettavasti paikalteen. Tämä ongelma korostuu erityisesti erittäin suurten teholuokkien yhteydessä, sillä tunnetun tekniikan mukainen poikittaisen magnetointi-induktanssin määrittämiseen tarvittava järjestely muodostuu huomattavan kookkaaksi ja kalliiksi.

Keksinnön lyhyt selostus

Keksinnön tavoitteena on siten kehittää menetelmä joka välttää edellä mainitut epäkohdat, ja mahdollistaa tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin suuruuden määrittämisen aikaisempaa yksinkertaisemmalla menetelmällä ja käyttäen aikaisempaa yksinkertaisempaa laitteistoa. Tämä tarkoitus saavutetaan keksinnön mukaisella menetelmällä, jolle on tunnusomaista se mitä on sanottu itsenäisen patenttivaatimuksen tunnusmerkkiosassa. Keksinnön edulliset suoritusmuodot ovat alivaatimusten kohteina.

Keksintö perustuu siihen ajatukseen, että ohjaamalla vaihtosuuntaajalla tahtikone tiettyyn tilaan, voidaan yksinkertaisilla mittaustoimenpiteillä määrittää tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin suuruus luotettavalla tavalla.

Keksinnön mukaisen menetelmän etuna on mittausjärjestelyn huomattava yksinkertaistuminen, nopeutuminen ja halpeneminen aikaisempiin tunnettuihin menetelmiin nähden.

Kuvioiden lyhyt selostus

Keksintöä selostetaan nyt lähemmin edullisten suoritusmuotojen yhteydessä, viitaten oheisiin piirroksiin, joista:

Kuvio 1 esittää tahtikoneen vektoripiirrosta;

Kuvio 2 esittää tahtikoneen vektoripiirrosta keksinnön mukaisen menetelmän yhteydessä;

Kuvio 3 esittää simuloituja tahtikoneen käyrämuotoja keksinnön menetelmän yhteydessä.

Keksinnön yksityiskohtainen selostus

Tahtikoneita säädetään usein käyttämällä vektorisäätöä. Tässä säätötavassa koneessa vaikuttavista vaihtosähkösuureista muodostetaan pyöriviä vektoreita, joilla on suuruus ja suunta. Vektorisäädön avulla ohjattavan koneen sähköisiä suureita pystytään hallitsemaan tarkasti. Tämä perustuu koneesta laadittuun sähköiseen malliin, jossa lasketaan koneessa vaikuttavia suureita. Näiden mallista estimoitujen ja mahdollisten mitattujen suureiden avulla konetta voidaan ohjata mahdollisimman optimaalisella tavalla.

Kuviossa 1 on esitetty tahtikoneen vektoripiirros, jolla pyritään selvittämään tahtikoneessa normaalin käytön aikana vallitsevia voita, jännitteitä ja virtoja. Vektorit on esitetty suorakulmaisessa dq-koordinaatistossa, jonka d akseli on kiinnitetty roottorin pitkittäisakselille eli d-akselille. Koska koordinaa-

tisto on kiinnitetty roottoriin, pysyvät vektorit paikoillaan koneen ollessa pysyvässä tilassa. Kuviossa 1 on esitetty staattorin käämivuovektori $\vec{\psi}_s$, ilmavälin käämivuovektori $\vec{\psi}_m$, staattorikäämin hajakäämivuovektori $\vec{\psi}_{s\sigma}$, staattorijännitevektori \vec{u}_s ja napakäämivirran vektori \vec{i}_f staattoriin redusoituna. Nämä kaikki

5 suureet ovat tunnetusti käytettävissä tahtikoneen säädön yhteydessä käytettäessä säätömenetelmänä vektorisäätöä tai siihen pohjautuvaa säätömenetelmää.

Seuraavassa keksinnön selityksessä viitataan laskutoimituksiin ja suureisiin, jotka suoritetaan edellä mainituksessa roottoriin kiinnitetyssä dq-
10 koordinaatistossa. On kuitenkin selvää, että laskutoimitukset ja suureet voidaan esittää myös muissa koordinaatistoissa tämän vaikuttamatta millään tavoin keksinnön mukaisen menetelmän toimintaan.

Keksinnön menetelmän aikana roottorikäämin eli napakäämin virta on lähes nolla. Tämän aikaansaamiseksi käämi on edullisesti oikosuljettu.
15 Käämin virta saadaan lähes nollassa myös avaamalla käämien päät, varustamalla käämi vastuksella tai syöttämällä sitä erillisestä virtalähteestä. Roottorikäämin kytkentä mittausta varten voidaan tehdä paitsi mekaanisella kytkentämuutoksella, myös sillan syöttölaitteen ohjauksella tai käämin ylijännitesuojan toiminnalla.

20 Keksinnön mukaisessa menetelmässä lähdetään liikkeelle käynnistämällä tahtikone edullisesti alennetulla vuolla. Tahtikone toimii tällöin reluktio-koneena, sillä roottoria ei ole magnetoitu napakäämin virran ollessa oleellisesti nolla.

Keksinnön mukaisesti koneen roottorin annetaan pyöriä vapaasti,
25 toisin sanottuna roottorin akselilla ei tule olla merkittävää kuormaa. Mikäli koneen pyörittämisen laitteiston momenttia ei voida alentaa mittauksen ajaksi, tulee se irrottaa koneen akselilta.

Koneen kippauksen estämiseksi käynnistyskiihdytyksen aikana on usein tarpeen rajoittaa koneen napakulmaa eli staattorivuon kulmaa koneen
30 pitkittäisakseliin eli d-akseliin nähden. Jos tämä napakulma halutaan rajoittaa arvoon $\delta_{s,\max}$, pitää vääntömomenttiohje rajoittaa arvoon

$$T_{ref,\max} = \frac{3p}{2} \frac{\psi_{s,ref}}{L_{s\sigma}} [\psi_{md} \sin(\delta_{s,\max}) - \psi_{mq} \cos(\delta_{s,\max})], \quad (1)$$

35 missä

- p on koneen napapariluku,
 $\psi_{s,ref}$ on staattorivuon ohjearvo,
 $L_{s\sigma}$ on staattorin hajainduktanssi,
 ψ_{md} on ilmavälin käämivuon pitkittäiskomponentti, ja
 ψ_{mq} on ilmavälin käämivuon poikittaiskomponentti. Ilmavälin kää-

mivuon komponentit voidaan joko mitata tai estimoida koneen jännitteistä ja virroista aikaisemmin tunnetuilla tavoilla. Staattorin hajainduktanssina $L_{s\sigma}$ voidaan käyttää joko moottorin valmistajan antamaa arvoa tai mitattua arvoa. Vääntömomentin rajoittaminen suoraan on luonnollisesti mahdollista ainoastaan sellaisen syöttävän vaihtosuuntaajan yhteydessä, jossa on mahdollisuus vääntömomentin säätöön. Tällainen vääntömomentin säädön mahdollistava toteutus on esitetty esimerkiksi julkaisussa US 4,678,248.

Edeltävän vääntömomenttiohjeen sijasta napakulma voidaan myös rajoittaa rajoittamalla staattorivuota vastaan kohtisuora momenttivirtaohje arvoon kaavan

$$i_{sTs\ ref, \max} = \frac{\psi_{md} \sin(\delta_{s, \max}) - \psi_{mq} \cos(\delta_{s, \max})}{L_{s\sigma}} \quad (2)$$

mukaisesti. Luonnollisesti on mahdollista kehittää kaavoja eteenpäin, ja saada toivottu napakulman rajoitus aikaan rajoittamalla muita suureita kulloisenkin käytettävän vaihtosuuntaajan tyyppin ja sen ominaisuuksien perusteella.

Käyttämällä moottorin kiihdytykseen 45 asteen rajoitusta, kaavasta (1) saadaan

$$T_{ref, \max} = \frac{3\sqrt{2}p}{4} \frac{\psi_{s,ref}}{L_{s\sigma}} [\psi_{md} - \psi_{mq}], \quad (3)$$

ja vastaavasti kaavasta (2)

$$i_{sTs\ ref, \max} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\psi_{md} - \psi_{mq}}{L_{s\sigma}}. \quad (4)$$

Käynnistysvaiheessa tahtimoottorin ohjausjärjestelmässä käytetään moottorin valmistajalta saatua arviota moottorin kyllästymättömästä poikittaista magnetointi-induktanssista.

Koneen kiihdyttyä mittauksen kannalta riittävän suureen nopeuteen, joka on esimerkiksi noin 30 %...60% kentänheikennysnopeudesta, nostetaan koneen napakulmaraja 90 asteeseen. On huomattava, että edellä selitetty muutos koneen roottoriin, kuten tämän oikosulkeminen roottorivirran kulun es-

5 tämiseksi, voidaan suorittaa myös koneen käynnistymisen jälkeen, mutta kuitenkin ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Kaavasta (1) saadaan napakulmarajan ollessa 90 astetta

$$T_{ref,max} = \frac{3p}{2} \frac{\psi_{s,ref}}{L_{s\sigma}} \psi_{md} . \quad (5)$$

10

Kaavasta (2) saadaan vastaavasti

$$i_{sTs ref,max} = \frac{\psi_{md}}{L_{s\sigma}} . \quad (6)$$

15

Menetelmän edullisen suoritusmuodon mukaisesti koneen nopeutta kasvatetaan samalla. Tarkoituksena on siis keksinnön mukaisesti saada koneen napakulma kasvamaan 90 asteen rajaan ja pysymään rajalla koko mittauksen ajan.

20 Keksinnön mukainen mittaus aloitetaan kun koneen vaimennuskäämien ja napakäämin virrat ovat vaimenneet. Tällöin myös koneen tuottama momentti on nolla, eikä koneen nopeus muutu merkittävästi mittauksen aikana.

Keksinnön mukaisesti edelleen moottorin staattorijännite ja -virta määritetään. Määrittäminen suoritetaan edullisesti mittaamalla, jolloin käytetään edullisesti moottoria ohjaavan taajuusmuuttajan antureita. Koska moottori

25 toimii 90 asteen napakulmalla ja roottorivirrat ovat nollassa, on sen staattorivirtavektori \vec{i}_s poikittaisakselin eli q-akselin suuntainen ja staattorijännitevektori \vec{u}_s negatiivisen pitkittäisakselin eli d-akselin suuntainen. Kuvion 2 vektoripiirroksessa on havainnollistettu näiden vektoreiden asemaa toimittaessa 90 asteen napakulmalla. Poikittainen magnetointi-induktanssi L_{mq} saadaan tällöin

30 kaavalla

$$L_{mq} = -\frac{u_{sd}}{\omega i_{sq}} - L_{s\sigma} , \quad (7)$$

missä

u_{sd} on staattorijännitteen pitkittäiskomponentti,

ω on moottorin sähköinen kulmanopeus,

i_{sq} on staattorivirran poikittaiskomponentti, ja

5 $L_{s\sigma}$ on staattorin hajainduktanssi.

Keksinnön mukaisesti moottorin vuota muutetaan edullisesti askeltaen ja mittaus toistetaan aina askeleen jälkeen transientin vaimennettua. Mitauksia toistamalla eri voiden arvoilla saadaan aikaan taulukko, jossa poikittainen magnetointi-induktanssi on esitetty poikittaisen virran funktiona. Taulukkoa
10 mitatessa on edullista käyttää koneen säätömallissa joko viimeisintä laskettua induktanssiarvoa tai viimeisimmästä mittausarvosta sopivalla funktiolla muodostettua arvoa. Moottorin vuota voidaan muuttaa mielivaltaisessa järjestyksessä, mutta yksinkertaisimmin vuon muuttaminen suoritetaan kasvattamalla vuota.

15 Keksinnön mukaisella menetelmällä saadun taulukon ja normaalilla tyhjäkäyntikokeella määritetyn pitkittäisen magnetointi-induktanssin taulukon avulla voidaan kokemuseräisesti ekstrapoloida induktanssien käyttäytyminen silloin, kun koneessa kulkee virtaa sekä pitkittäisessä että poikittaisessa suunnassa.

20 Vaihtoehtoisesti edellä kuvaillulle askeltavalle vuon muuttamiselle voidaan myös käyttää hitaasti muuttuvaa vuo-ohjetta. Tällöin kaavassa (7) tulee huomioida lisäksi vuon ja induktanssin muutoksista johtuvat jännitetermit.

Kaavan (7) sijasta induktanssiarvot voidaan määrittää myös epäsuorasti. Tällöin lasketaan poikittaisen magnetointi-induktanssin alkuarvon
25 avulla jännitearvoa kaavalla

$$u_{sd} = -\omega i_{sq} (L_{mq} + L_{s\sigma}). \quad (8)$$

Kaavan laskettua jännitettä verrataan esimerkiksi PI-säätäjällä
30 mitattuun jännitteeseen. Tällöin säätäjän lähtö korjaa poikittaisen magnetointi-induktanssin estimaattia siten, että estimoidun jännitteen virhe mitattuun pienenee.

Kun toivotut mittaukset on saatu keksinnön menetelmän mukaisesti suoritettua, napakulmaraja palautetaan esimerkiksi arvoon 45 astetta, ja moottori jarrutetaan pysähdyksiin. Normaaliin toimintaan pääsemiseksi tulee roottorin kytkeä vielä palauttaa normaaliksi.
35

- Kuviossa 3 on esitetty erään identifiointiajon simulaatiotulokset, joista seuraavassa on lyhyt selvitys keksinnön menetelmän selvittämiseksi. Identifiointi on aloitettu kytkemällä moottoriin sähkötkä hetkellä nolla. Tämän jälkeen on odotettu 5 sekuntia, jotta koneen virrat ehtivät asettua. Staattorin käämivuo-
- 5 ohje on asetettu arvoon 0,2 per unit (pu) eli arvoon, joka vastaa 20% nimellisestä arvosta. Hetkellä 5 sekuntia nopeusohjetta on alettu kasvattaa, jolloin moottori alkaa pyöriä. Napakulmarajana on pidetty 45 astetta aina 13 sekuntiin saakka, jolloin raja on nostettu arvoon 90 astetta. Rajan kasvamisesta seuraa aluksi momentin kasvu, mutta oikosuljetun roottorin vuoksi virrat roottorissa
- 10 vaimenevat nopeasti pois. Jotta kone varmasti pysyisi napakulmarajassa, nopeusohjetta on nostettu hetkellä 14 sekuntia. Hetkellä 17 s mittaus on aloitettu, mikä ilmenee käämivuon askeltavana kasvuna hetkestä 19 s alkaen. Kuviossa 3 on myös muiden suureiden käyrämuotoja, mutta edellä on selvitetty keksinnön ymmärtämisen kannalta tärkeimmät suureet.
- 15 Alan ammattilaiselle on ilmeistä, että tekniikan kehittyessä keksinnön perusajatus voidaan toteuttaa monin eri tavoin. Keksintö ja sen suoritusmuodot eivät siten rajoitu yllä kuvattuihin esimerkkeihin vaan ne voivat vaihdella patenttivaatimusten puitteissa.

Patenttivaatimukset

1. Menetelmä tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin määrittämiseksi tahtikoneen ollessa syötetty vaihtosuuntaajalla, t u n n e t t u siitä, että menetelmä käsittää vaiheet, joissa
 - 5 käynnistetään tahtikone ilman kuormaa tai kevennetyllä kuormalla, pidetään tahtikoneen roottorivirta oleellisesti nollassa, kiihdytetään tahtikone mittauksen aloituskulmanopeuteen, ohjataan tahtikoneen napakulma (δ_s) oleellisesti 90 asteeseen, määritetään tahtimootorin staattorijännitettä (\bar{u}_s), staattorivirtaa (\bar{i}_s)
 - 10 sekä sähköistä kulmanopeutta (ω), ja määritetään tahtikoneen poikittainen magnetointi-induktanssi (L_{mq}) staattorijännitteeseen (\bar{u}_s), staattorivirtaan (\bar{i}_s) ja koneen sähköiseen kulmanopeuteen (ω) perustuen.
2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että tahtikoneen käynnistäminen käsittää vaiheen, jossa tahtikone käynnistetään alennetulla vuolla.
3. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että menetelmä käsittää lisäksi vaiheen, jossa muutetaan tahtikoneen vuota ja suoritetaan staattorijännitteen (\bar{u}_s), staattorivirran (\bar{i}_s) sekä koneen
 - 20 sähköisen kulmanopeuden (ω) määrittäminen, sekä näihin perustuva poikittaisen magnetointi-induktanssin (L_{mq}) määrittäminen toistuvasti vuon muuttuessa.
4. Jonkin edeltävän patenttivaatimuksen 3 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että tahtikoneen vuota muutetaan askelittain, ja mittaukset
 - 25 suoritetaan askelmuutoksen jälkeen.
5. Patenttivaatimuksen 3 tai 4 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että menetelmä käsittää lisäksi vaiheen, jossa koneen nopeutta kiihdytetään.
6. Patenttivaatimuksen 1 tai 2 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että koneen käynnistäminen käsittää vaiheen, jossa kone käynnistetään rajoitetulla napakulmalla.
7. Jonkin edeltävän patenttivaatimuksen 1 - 2 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että koneen roottorivirran pitäminen oleellisesti nollassa käsittää vaiheen, jossa roottorikäämit oikosuljetaan, avataan tai varustetaan vas-
 - 35 tuksella, tai jossa roottorikäämejä syötetään virtalähteestä.

8. Jonkin edeltävän patenttivaatimuksen 1 - 7 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että tahtikoneen poikittainen magnetointi-induktanssi (L_{mq}) lasketaan kaavalla $L_{mq} = -\frac{u_{sd}}{\omega i_{sq}} - L_{s\sigma}$, missä u_{sd} on staattorijännitteen pitkittäiskomponentti, ω on moottorin sähköinen kulmanopeus, i_{sq} on staattorivirran poikittaiskomponentti, ja $L_{s\sigma}$ on staattorin tunnettu hajainduktanssi.

9. Jonkin edeltävän patenttivaatimuksen 1 - 7 mukainen menetelmä, tunnettu siitä, että tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin määrittäminen käsittää vaiheet, joissa lasketaan poikittaisen magnetointi-induktanssin (L_{mq}), staattorin tunnetun hajainduktanssin ($L_{s\sigma}$), moottorin sähköisen kulmanopeuden (ω) ja määritetyn staattorivirran pitkittäiskomponentin (i_{sq}) avulla estimaattia ($u_{sd,est}$) staattorijännitteen pitkittäiskomponentille kaavalla $u_{sd,est} = -\omega i_{sq} (L_{mq} + L_{s\sigma})$,

verrataan staattorijännitteen pitkittäiskomponentin estimaattia ($u_{sd,est}$) määritettyyn staattorijännitteeseen (u_{sd}), ja korjataan poikittaisen magnetointi-induktanssin (L_{mq}) suuruutta vertailun perusteella.

(57) Tiivistelmä

Menetelmä tahtikoneen poikittaisen magnetointi-induktanssin määrittämiseksi tahtikoneen ollessa syötetty vaihtosuuntaajalla. Menetelmä käsittää vaiheet, joissa käynnistetään tahtikone ilman kuormaa tai kevennetyllä kuormalla, pidetään tahtikoneen roottorivirta oleellisesti nollassa, kiihdytetään tahtikone mittauksen aloituskulmanopeuteen, ohjataan tahtikoneen napakulma (δ_s) oleellisesti 90 asteeseen, määritetään tahtimoottorin staattorijännitettä (\bar{u}_s), staattorivirtaa (\bar{i}_s) sekä sähköistä kulmanopeutta (ω), ja määritetään tahtikoneen poikittainen magnetointi-induktanssi (L_{mq}) staattorijännitteeseen (\bar{u}_s), staattorivirtaan (\bar{i}_s) ja koneen sähköiseen kulmanopeuteen (ω) perustuen.

(Kuvio 2)

1/2
L5

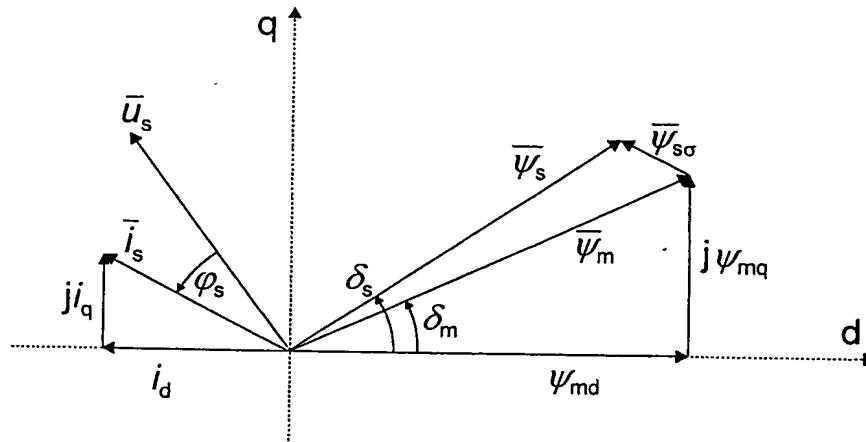


FIG 1

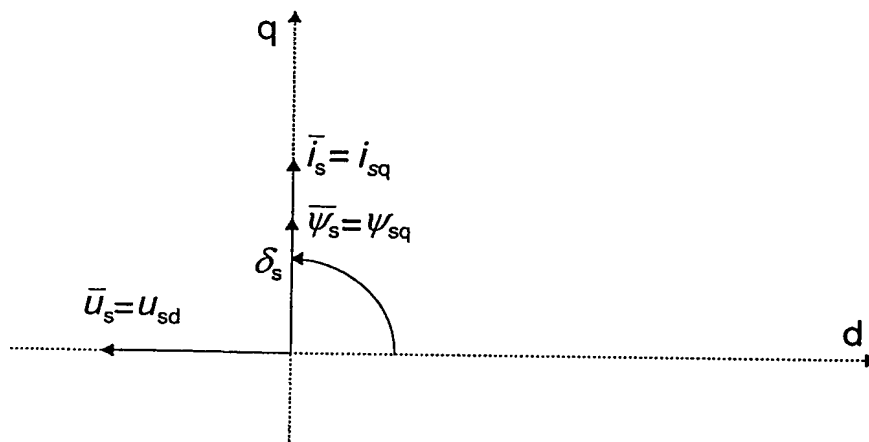


FIG 2

2/2
L5

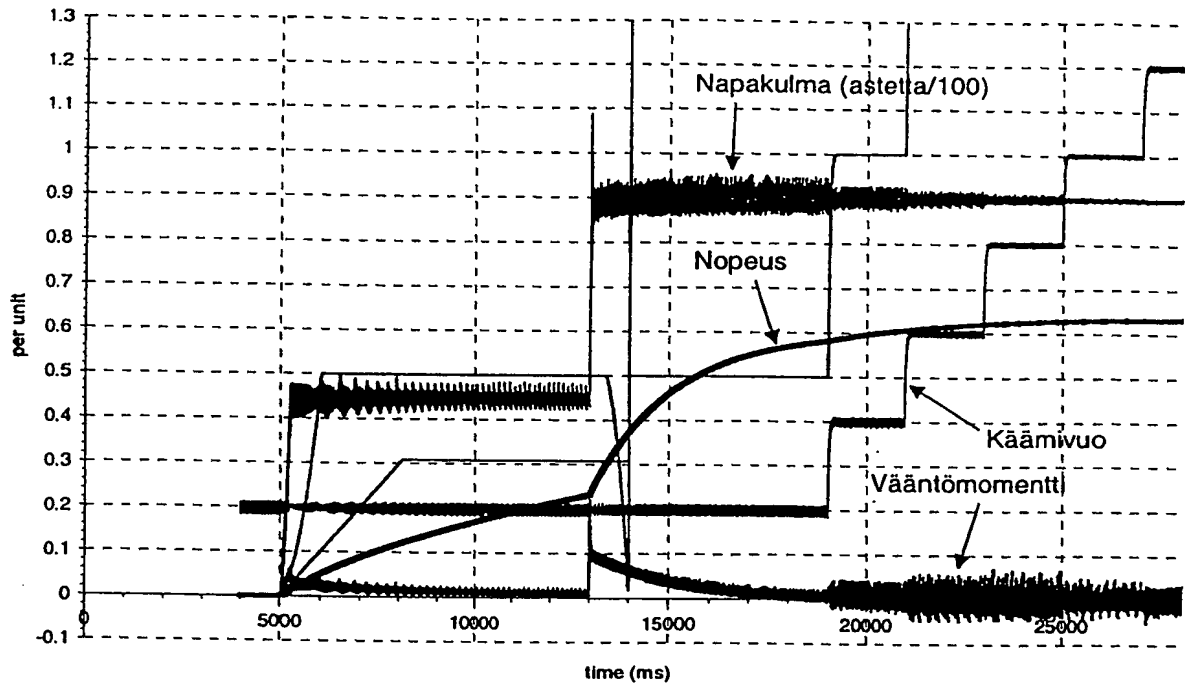


FIG 3